

文章编号:1000-0690(2001)02-0108-05

北半球冬季纬向平均环流的结构及对我国气候的影响

龚道溢¹, 王绍武²

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘要:冬季对流层纬向平均纬向风(u)最主要的模态表现为两个相反符号的极值中心, 一个在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间, 另一个则在 55°N 。与此相联系的纬向平均高度场最突出的模态也是有两个相反符号的中心, 一个在 40°N 附近, 另一个则在 65°N 附近。因此 40°N 和 65°N 纬向平均位势高度的差可以很好定义西风指数。西风环流的强弱不仅对北半球的气候有显著影响, 对我国冬季的气温和降水也有显著关系。在高指数环流盛行的年份, 我国普遍气温偏高。160个站平均气温与西风指数的相关系数达到0.63。同时华北及以南降水增加, 其中黄土高原、关中平原及以东地区相关最显著。160站平均降水量与西风指数的相关达0.38。高指数年份里, 西伯利亚高压和东亚大槽都减弱, 低指数年份则增强, 因此影响我国冬季气候。

关键词: 西风环流; 结构; 中国; 气候

中图分类号: P467 **文献标识码:** A

1 前言

20世纪30年代后期 Rossby^[1]最早提出了西风指数(zonal index)的概念, 即用 35°N 和 55°N 纬向平均海平面气压的差反映北半球温带地区($35^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$)西风的强弱, 以此来作为定量描述大气运动基本状态的一个参数。温带西风强时称为“高指数”环流, 弱时则是“低指数”环流。Willett及Namias^[2]随后指出, 西风极大值出现的位置也随西风指数的强弱有明显的经向移动, 高指数时强西风位置偏北。低指数时强西风位置偏南, 多位于副热带, 可达 30°N 左右。Namias(1950)^[2]进一步提出了指数循环(the index cycle)的概念。这些开创性的工作极大地推动了大气环流的研究。早期人们主要是从天气学的角度来研究西风指数的变化的, 不过由于指数循环的时间尺度约4~6周, 所以月平均西风强度的变化所反映的是时间尺度更长的西风变率。王绍武^[3]在1963年利用10年北半球500 hPa月平均高度研究了西风指数的变化, 指出有准两年振荡, 但由于时间序列太短, 不足以研究西风强度更长尺度的变率。

近来大家逐渐认识到, 西风指数的强弱, 反映了

中高纬大气环流的基本状态, 这种状态对高纬与中低纬之间大气质量、动量及热量的交换, 与半球及全球气候异常均有密切的联系。Thompson和Wallace^[4]指出北半球冬季海平面气压场最突出的模态具有纬向对称的结构, 并称之为“北极涛动”。整个北半球对流层到平流层低层, 高度场的结构都是一种大致纬向对称的空间型^[5~7]。在南半球纬向结构的特征更明显, 称为“南极涛动”^[8]。两者实质上反映的都是中纬度西风强度。它们不仅与中高纬, 与低纬风场及温度场也有密切的关系。本文将分析北半球冬季西风环流的结构, 以及与我国冬季温度和降水变化之间的关系。

2 纬向环流的结构

在Rossby的工作之后, Lorenz(1951)^[9]曾指出, 由于大气质量在不同纬度带间交换造成的气压变化, 有两个地区有最好的一致性, 一个地区在 65°N , 另一个在 35°N , 这意味着用这两个纬度的海平面气压差来代表西风指数可能比用 55°N 和 35°N 更合理。除此之外, 后来人们也陆续使用过其它不同的纬圈组合来表示西风指数(如 40°N 与 60°N)。一些研究发现, 不管是对流层中层还是上层, 纬向风

收稿日期: 2000-06-06; 修订日期: 2000-09-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划首批项目(G1998040900)。

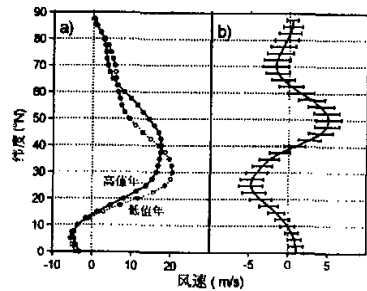
作者简介: 龚道溢(1969-), 男, 博士, 从事气候变化及影响研究。E-mail: gdy@pku.edu.cn 网址: <http://www.irs.bnu.edu.cn/faculty/GongDY/gdy.htm>

(u) 的异常在中纬度和高纬度表现出反号的特征^[10,11],因此丁敏芳等^[12]曾用 35°N 和 55°N 上纬向风的差值来代表西风指数(即 $U_{35^{\circ}\text{N}} - U_{55^{\circ}\text{N}}$)。Thompson 和 Wallace^[4]用海平面气压经验正交函数分析(EOF)的时间系数来反映纬向风。这些不同的定义可能都是考虑到西风环流的某些方面,他们之间有密切的联系。分析西风环流的结构可以帮助我们更好地理解这些西风指数的意义。

利用 NCEP/NCAR 的 1958~1998 再分析资料^[13],分别对 500 hPa 和 1 000 hPa 纬圈平均的纬向风(u)进行 EOF 分析,分析前对资料都进行了面积加权处理 $[\times \cos(\psi)]$,这样处理后的风场能比较真实地反映大气动量。后面的分析中对高度场也做了同样处理,以便更合理表示大气质量的相对多少。500 hPa 和 1 000 hPa 纬圈平均纬向风(u)的 EOF 分析第一个模态分别解释各自总方差的 45.6% 和 56.4%,且结构非常相似:都有两个相反符号的极值中心,一个在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 附近,另一个则在 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 。这种结构可能说明了中纬最大西风中心的南北位置的移动。当最大西风带位置偏北时,则中纬度偏南地区出现东风异常,高纬出现西风异常,反之亦然。图 1 是 500 hPa 纬向平均 u 的合成情况。可见在 5 个极大正值年里强西风分布的纬度范围更宽,超过 10 m/s 的纬度包括了 $20^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$,中心在 40°N 左右,但最大西风值稍低;5 个极大负值年里,最大西风带范围变窄,超过 10 m/s 的纬度包括了 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$,而且中心位置偏南 $5\sim 10$ 个纬度,可达 30°N 左右,最大西风值偏高。

如果用高度场进行 EOF 分析,则最突出的模态也有两个相反符号的中心,一个在 40°N 附近,另外一个则在 65°N 附近。对高度场与纬向风做奇异值分解(SVD),这种结构特征十分明显。图 2(a)是 500 hPa 纬圈平均高度距平与纬圈平均 u 距平的 SVD 分析第一对模态,图 2(b)是 1 000 hPa 的情况。这一对模态分别解释了 500 hPa 和 1 000 hPa 上高度和 u 协方差的 46.2% 和 57.5%。可见近地面和对流层中层的特点非常相似,对于高度场都是在 40°N 和 65°N 分别出现性质相反的两个极值中心,与此相对应的 u 的两个相反性质的极值都是出现在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 及 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 附近。

有趣的是高度场极值出现的两个纬度与南半球的南极涛动的两个极值纬度是完全一样的,这可能并非是偶然现象,而是反映了大气内部的固有结构



(a)中实线是 5 个高指数年平均,虚线是 5 个低指数年的平均,5 个高、低指数年由 EOF 分析的时间系数来确定,
(b)为高值年减低值年结果,横线标出标准差大小
图 1 500 hPa 纬向平均纬向风的合成情况

Fig. 1 Composition of the zonal wind at 500hPa. The mean of five high index years is shown in solid line and low years in dashed line. Shown in (b) is the difference between them. All extreme years are chosen by sorting the time coefficients of the EOF analysis for zonal-mean u . Error bars are shown as one standard deviation.

特征。而且不仅是上述这两个层次上如此,用 1 000 hPa 到 200 hPa 共 10 层的 u 和高度场资料分别单独进行 EOF 分析或一起做 SVD 分析,都发现低层与高层,纬向风及高度场的特征有极大的相似性,而且二者间的关系也如此^[5]。极值中心的位置上下都一致,反映出西风异常的正压性质。

因此,根据上面的分析可以得出结论,西风指数的强弱可以用 40°N 和 65°N 纬圈平均位势高度的差来表示,即 $H_{40^{\circ}\text{N}} - H_{65^{\circ}\text{N}}$ 。根据 Rossby 和 Namias 等最早的研究,西风指数应该能尽可能地描述温带地区的纬向西风的强弱。本文前面的分析表明,与高度场的变化相联系的风场,在 55°N 有最大的相关。在 500 hPa 位势高度上西风指数($H_{40^{\circ}\text{N}} - H_{65^{\circ}\text{N}}$)与 55°N 西风($U_{55^{\circ}\text{N}}$)间相关系数达 0.96。用 35°N 和 55°N 上纬向风的差值来反映西风的变化,虽然在统计上与西风指数($H_{40^{\circ}\text{N}} - H_{65^{\circ}\text{N}}$)有很高的相关(-0.90),但物理意义上显然不如后者清晰。可见用 $H_{40^{\circ}\text{N}} - H_{65^{\circ}\text{N}}$ 来代表西风指数从其代表性和物理意义上看的确是一个很好的指标(图 3,表 1)。

3 西风环流对我国冬季气温和降水的影响

图 4 是冬季西风环流指数与我国 160 个站 1958/1959 冬季到 1998/1999 冬季气温和降水的同时相关。很明显,我国大陆上几乎所有地区的气温

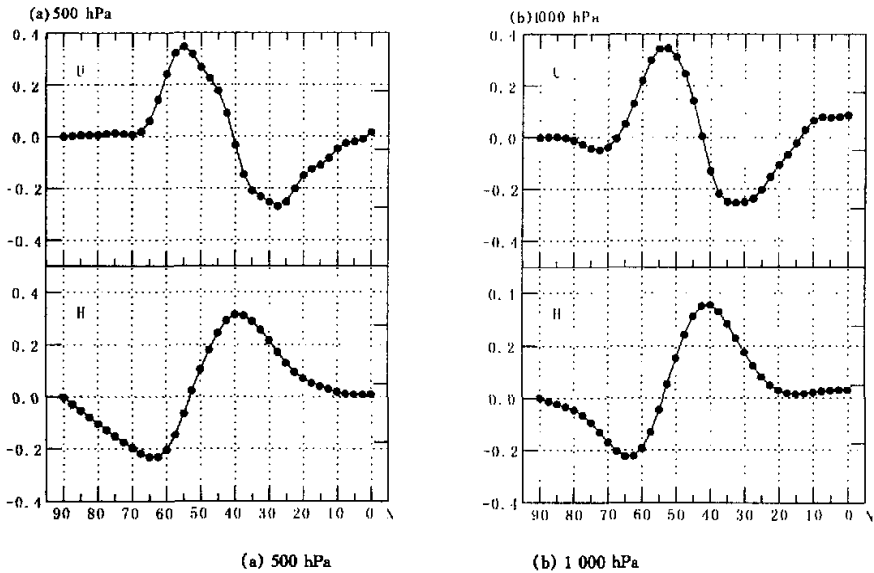


图2 500 hPa(a)和1 000 hPa(b)纬圈平均冬季纬向风 (U)与位势高度(H)、奇异值分解(SVD)的第一对模态 (纵坐标为无量纲值)

Fig. 2 Dominant modes revealed by the SVD analysis between the geopotential height and zonal wind at 500 hPa (a) and 1 000 hPa (b)

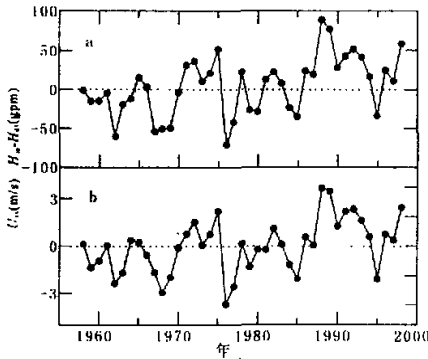


图3 500 hPa 西风指数的比较 (U_{35} 即 55°N 纬圈平均纬向风; $H_{40} - H_{65}$ 则为 40°N 与 65°N 纬圈平均高度的差)

Fig. 3 Comparison between the zonal index and zonal wind at 55°N.

表 1 不同要素间的相关系数

Table 1 Mutual correlation among circulation indices

	$H_{40} - H_{65}$	H_{40}	H_{65}
$U_{35} - U_{55}$	-0.90	-0.87	0.85
U_{35}	-0.70	-0.71	0.64
U_{55}	0.96	0.90	-0.93

U 表示 500 hPa 纬向风, H 表示位势高度, 下标数字表示纬度

与西风指数都成正相关, 仅有青藏高原东南部及相

邻的横断山区, 个别站相关系数较低或者是负相关。绝大部分地区相关都达 95% 信度水平。相关值最高的是华北北部及东北地区, 相关系数在 0.6 以上。我国 160 个站平均气温与西风指数的相关系数也达到 0.63。所以, 在高指数环流盛行的年份, 我国气温偏高。在低指数环流盛行的年份则偏低。从降水与西风环流指数的相关分布来看, 就远没有气温与西风环流的关系那样的空间一致性。105°E 以东地区中华北及以南主要是正相关, 从黄土高原、关中平原及以东一带地区, 都是相关显著区。其它地区主要是负相关。由于西部及东北冬季降水量比较少, 南方降水量大, 所以 160 站平均冬季降水量与西风指数间的相关系数达 0.38, 也是显著的正相关。

通常影响我国冬季气候的是区域性的大气环流系统, 如地面的西伯利亚高压和高空的东亚大槽^[14, 15]。由于西风环流指数强调的是纬圈平均状况, 很容易会使人认为与区域性槽脊或气压系统的高低变化没有太大关系。但许多研究发现, 西风环流的强弱变化与各种涡旋, 包括大尺度的定常波及天气尺度的瞬变波都有密切的关系。Robinson (1994)^[16] 在简单的两层大气环流模式中, 人为地将西风指数加强或减弱, 结果发现涡旋活动的动量输送与西风指数的强弱之间, 是一个正反馈关系。

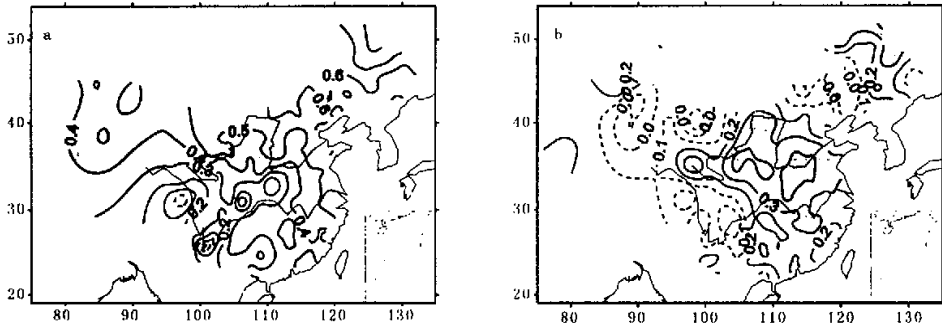


图 4 西风环流指数与我国冬季气温(a)及降水量(b)的相关系数(阴影区达 95% 信度水平)

Fig. 4 Correlation coefficients between zonal index and temperature (a) and precipitation (b) over the mainland of China. Area above 95% confidence level shaded

而涡旋活动对区域气候有着直接的影响。

图 5 显示了与西风环流变化相关的亚洲地区 500 hPa 位势高度和海平面气压的变化。图 5(a) 是标准化的西风环流指数与海平面气压的回归系数, 即当西风指数变化一个标准差时, 对应的各格点的气压变化值。可见当西风环流强时, 整个亚洲大陆中高纬海平面气压都下降, 西伯利亚高压的强度是减弱的。中心区域的强度减弱 1~2 hPa。图 5(b) 是标准化的西风环流指数与 500 hPa 位势高度间的

回归系数, 即当西风指数变化一个标准差时, 对应的各格点高度变化。可见在西风增强的情况下, 东亚大槽变弱, 高度增加 10~20 gpm。因此, 在高空西风气流更为平直。因此, 当西风环流强时, 由于西伯利亚高压强度及东亚大槽的减弱, 南下的冷空气活动也相应减弱, 所以我国大部分地区气温会升高。同时, 在东部地区, 由于北方冷空气势力减弱, 雨带位置偏北, 造成长江以北及黄土高原一带降水增加。

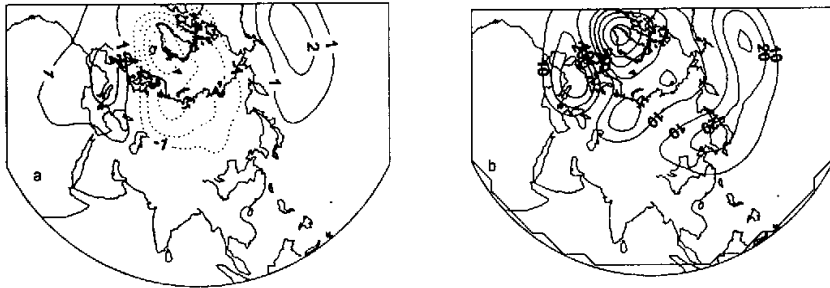


图 5 海平面气压(a)和 500 hPa 位势高度(b)与西风指数间的回归系数

Fig. 5 Sea level pressure (a) and 500 hPa geopotential height regressed onto the standardized winter time series of zonal index. Unit in (a) is hPa per standard deviation, (b) gpm per standard deviation of zonal index

4 结 论

用 40°N 与 65°N 纬圈平均位势高度差可以很好地表示西风指数。

西风环流指数与我国冬季气候有密切关系。高指数年里气温偏高, 与 160 站平均气温相关为 0.63。与降水相关达 0.38, 不过有明显的区域差

别。西风环流主要是通过影响西伯利亚高压和东亚大槽而影响中国气候。

参考文献:

- [1] Rossby C G. Relationship between variations in the intensity of the zonal variation and the displacement of the semi-permanent centers of action[J]. J Marine Res., 1939, 2: 38-55.

- [2] Namias J. The index cycle and its role in the general circulation [J]. *J. Meteorology*, 1950, 7:130-139.
- [3] 王绍武. 北半球 500 毫巴月平均环流特征及演变规律的研究: 西风指数[J]. *气象学报*, 1963, 33(3): 361-374.
- [4] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophysical Res. Lett.*, 1998, 25: 1297-1300.
- [5] Thompson D W J, Wallace J M. Structure of the Arctic and Antarctic Oscillations[A]. In: Proceedings of the 23rd Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop[C]. NOAA, NWS, Department of Commerce, Florida, USA. 1998. 281-284.
- [6] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation, Part I: Month-to-Month variability[J]. *J. Climate*, 2000, 13(5):1000-1016.
- [7] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation, Part II: Trends[J]. *J. Climate*, 2000, 13(5):1018-1036.
- [8] Gong D Y, Wang S W. Definition of Antarctic Oscillation Index [J]. *Geophysical Res. Lett.*, 1999, 26:459-462.
- [9] Lorenz E. Seasonal and irregular variations of the northern hemisphere sea - level pressure profile[J]. *J. Meteorology*, 1951, 8:52-59.
- [10] Branstator G. The relationship between zonal mean flow and quasi-stationary waves in the midtroposphere[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41:2163-2178.
- [11] Kidson J W. Index cycles in the northern hemisphere during the Global Weather Experiment[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, 113:607-623.
- [12] Ting M, Hoerling M P, Xu T Y, Kumar A. Northern hemisphere teleconnection patterns during extreme phases of the zonal - mean circulation[J]. *J. Climate*, 1996, 9: 2614 - 2633.
- [13] Kalnay, E, M Kanamitsu, R Kistler, et al. The NCEP/NCAR 40 - year Reanalysis Project[J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, 77:437-471.
- [14] 龚道溢, 王绍武. 近百年我国的异常暖冬与冷冬[J]. *灾害学*, 1999, 14(2):63-68.
- [15] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究[J]. *地理学报*, 1999, 54(2):125-133.
- [16] Robinson W A. Eddy feed-backs on the zonal index and eddy-zonal flow interactions induced by zonal flow transience[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1994, 51:2553-2562.

Structure of the Zonal-Mean Circulation Over the Northern Hemisphere and Its Impact on Climate of China in Winter

GONG Dao-yi¹, WANG Shao-wu²

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster Beijing Normal University, Beijing 100875; 2 Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: As revealed by the empirical orthogonal function analysis (EOF), the dominant modes of northern hemispheric zonally-mean wind (u) in winter show two centers of opposite sign, one center located near $30^{\circ} - 35^{\circ}\text{N}$ and another near 55°N . The prominent modes of geopotential heights also show two centers, one is at 40°N and another at 65°N . These two modes connected tightly. So, the zonal index can be defined as the difference in geopotential height between 40°N and 65°N . This kind of zonal index correlate with westerly of 55°N at 0.96. The anomalous variation of the westerly can impact the winter surface temperature and precipitation of China significantly. During the high-index years, most of China become warmer, and the precipitation in the mid-eastern China will increase. Correlation between the zonal index and the 160-station mean temperature and precipitation is 0.63 and 0.38 respectively. The Siberia High and Eastern Asia Trough that show the powerful control of winter climate of China, usually become weak during the high zonal index years.

Key words: Zonal wind; Structure; China; Climate